

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Antonio Dominik Jelenski**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Dr. dc. Vera Rede

Student:

Antonio Dominik Jelenski

Zagreb, 2018.

# IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem svojoj mentorici dr. sc. Veri Rede na mentorstvu, stručnoj pomoći, savjetima, utrošenom vremenu te trudu. Također zahvaljujem asistentici Zrinki Švigelj, mag.appl.chem. na pomoći i zalaganju.

Zahvaljujem tvrtki Haberkorn d.o.o. na potpori i donaciji brusnih papira za provedbu eksperimentalnoga dijela ovoga rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci i kolegama na strpljenju, povjerenju i iznimnoj podršci tijekom studiranja.

Antonio Dominik Jelenski



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonio Dominik Jelenski**

Mat. br.: 0035193678

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku otpornost Al-legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of abrasive grain size on the abrasive wear resistance of Al-alloy**

Opis zadatka:

Intenzitet abrazijskog trošenja različitih tehničkih materijala ovisi o puno faktora, a jedan od njih je i veličina abrazivnih čestica. U pravilu se s povećanjem veličine abrazivnih čestica linearno povećava i intenzitet abrazijskog trošenja, ali samo do određene veličine čestica. Daljnim povećanjem abrazivnih čestica intenzitet trošenja se ili ne mijenja ili mijenja, pada ili raste, ali sa znatno manjom stopom rasta.

U završnom radu potrebno je istražiti kako veličina abrazivnih čestica utječe na intenzitet abrazijskog trošenja aluminijske legure AA 2024-T351. Ispitivanja treba provesti na uređaju *Taber abrader*. Na temelju dobivenih rezultata donijeti odgovarajuće zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Zadatak zadala:

*Rede*

Izv. prof. dr. sc. Vera Rede

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Predsjednik Povjerenstva:

*Branko Bauer*

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK .....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD .....	1
2. TROŠENJE.....	2
2.1. Mehanizmi trošenja.....	2
2.2. Abrazija .....	2
2.2.1. Teorijska abrazija.....	3
2.2.2. Realna abrazija.....	4
2.2.2.2. Mehanizmi trošenja abrazijom.....	5
2.3. Krična veličina abrazivnoga zrna .....	13
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	15
3.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja.....	15
3.2. Materijali za ispitivanje.....	15
3.3. Rezultati ispitivanja .....	20
3.4. Analiza rezultata .....	28
4. ZAKLJUČAK.....	31
LITERATURA.....	32
PRILOZI .....	33

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Abrazijsko trošenje [2] .....	3
Slika 2.	Teorijski model abrazije [3] .....	3
Slika 3.	Jedinični događaj abrazije [1] .....	4
Slika 4.	Abrazija u dodiru dvaju tijela (a) i triju tijela (b) [4] .....	5
Slika 5.	Čista abrazija [1] .....	6
Slika 6.	Selektivna abrazija [1] .....	7
Slika 7.	Nulta abrazija [1] .....	8
Slika 8.	Mikrobrzdanje [4] .....	9
Slika 9.	Mirkorezanje [4] .....	9
Slika 10.	Mikronaprsnuća [4] .....	10
Slika 11.	Mikroumor [4] .....	10
Slika 12.	Ovisnost otpornosti abrazijskom trošenju o tvrdoći materijala [5] .....	11
Slika 13.	Ovisnost abrazijskoga trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [6] .....	12
Slika 14.	Utjecaj veličine abrazivnoga zrna na abrazijsko trošenje materijala [7] .....	13
Slika 15.	Utjecaj veličine abrazivnoga zrna na gubitak mase trošenoga materijala [8] .....	14
Slika 16.	Dio stajnoga trapa zrakoplova .....	15
Slika 17.	Uzorci prve skupine prije ispitivanja .....	16
Slika 18.	Aluminijski valjak iz kojega su izrezani uzorci druge skupine .....	16
Slika 19.	Uzorci druge skupine prije ispitivanja .....	17
Slika 20.	Geometrija ispitnih uzoraka .....	17
Slika 21.	Mikrostruktura aluminijske legure AA 2024-T351 .....	19
Slika 22.	Mikrostruktura tehnički čistoga aluminijska [11] .....	19
Slika 23.	Uređaj za mjerenje mase <i>OHAUS Analytical Plus</i> .....	20
Slika 24.	Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje <i>Taber abrader</i> .....	21
Slika 25.	Brusni papiri .....	22
Slika 26.	Uzorak pripremljen za abrazijsko trošenje .....	22
Slika 27.	Intenzitet trošenja Al-legure AA 2024-T351 .....	25
Slika 28.	Ovisnost intenziteta trošenja Al-legure AA 2024-T351 o srednjem promjeru abrazivnoga zrna .....	25
Slika 29.	Intenzitet trošenja tehnički čistoga aluminijska .....	26
Slika 30.	Ovisnost intenziteta trošenja tehnički čistoga aluminijska o srednjem promjeru abrazivnoga zrna .....	26
Slika 31.	Površine skupine uzoraka Al-legure AA 2024-T351 nakon ispitivanja .....	27
Slika 32.	Uzorci nakon ispitivanja .....	27
Slika 33.	Gubitak volumena oba ispitivana materijala za različite kvalitete brusnoga papira .....	28
Slika 34.	Intenzitet trošenja oba ispitivana materijala za različite kvalitete brusnoga papira .....	28
Slika 35.	Gubitak volumena oba ispitivana materijala za različite srednje promjene abrazivnoga zrna .....	29
Slika 36.	Intenzitet trošenja oba ispitivana materijala za različite srednje promjene abrazivnoga zrna .....	29

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Kemijski sastav aluminijske legure AA 2024-T351 [9].....	18
Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure AA 2024-T351 [9].....	18
Tablica 3. Fizikalna i mehanička svojstva tehnički čistoga aluminija [10] .....	18
Tablica 4. Usporedba kvalitete brusnoga papira i srednjega promjera abrazivnoga zrna .....	23
Tablica 5. Veličine poprečnih presjeka abradiranih površina .....	23
Tablica 6. Gubitak mase pri ispitivanju .....	24
Tablica 7. Gubitak volumena pri ispitivanju .....	24

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\alpha$	°	kut upada pravilne četverostrane piramide u površinu trošenoga materijala
$H_a$	HV	tvrdoća abraziva
W	[mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> ]	intenzitet trošenja
$H_m$	HV	tvrdoća trošenoga materijala
$d_{krit}$	[μm]	kritična veličina abrazivnoga zrna



## SAŽETAK

Cilj je ovoga rada istražiti kako veličina abrazivnih čestica utječe na intenzitet abrazijskoga trošenja aluminijske legure AA 2024-T351 i tehnički čistoga aluminijskog aluminija. Rad se sastoji od teorijskoga i eksperimentalnoga dijela. U teorijskom dijelu opisano je trošenje, mehanizmi trošenja, abrazijsko trošenje, utjecajni čimbenici pri abrazijskom trošenju i fenomen kritične veličine abrazivnoga zrna.

Tijekom eksperimentalnoga istraživanja utvrđeno je da veličina abrazivnih čestica ima veliki utjecaj na intenzitet trošenja ispitivanih materijala. Intenzitet trošenja tehnički čistoga aluminija viši je od Al-legure AA 2024-T351. Kod oba materijala izražena je kritična veličina abrazivnoga zrna. Zbog različite mikrostrukture i svojstava Al-legura ima višu vrijednost kritične veličine abrazivnoga zrna ( $\approx 125 \mu\text{m}$ ) nego tehnički čisti aluminij ( $\approx 82 \mu\text{m}$ ). Također je utvrđeno da veličina trošene površine uzoraka utječe na intenzitet trošenja i ne smije se zanemariti pri iskazivanju rezultata.

**KLJUČNE RIJEČI:** abrazijsko trošenje, kritična veličina abrazivnoga zrna, Al-legura, aluminij

## SUMMARY

The purpose of this paper is to determine the influence of abrasive size on wear rate of Al-alloy AA 2024-T351 and technically pure aluminum. The paper is comprised of a theoretical and an experimental part. Wear, wear mechanisms, abrasive wear, influential abrasive wear factors and the phenomenon of critical abrasive size are explained in the theoretical part.

During the experimental part it was determined that the abrasive size has a great influence on abrasive wear. Wear rate of technically pure aluminum is higher than the wear rate of Al-alloy AA 2024-T351. Critical particle size is noticeable for both materials. Due to different microstructures and properties, Al-alloy has a higher value of critical abrasive size ( $\approx 125 \mu\text{m}$ ) than technically pure aluminum ( $\approx 82 \mu\text{m}$ ). It was also determined that the size of the sample's worn surface affects the wear rate and can not be overlooked when results are reported.

**KEY WORDS:** abrasive wear, critical abrasive particle size, Al-alloy, aluminum

## 1. UVOD

Proces trošenja materijala u većini je slučajeva nepoželjan i jedan je od tri glavna uzroka dotrajalosti proizvoda. Postoje različiti mehanizmi trošenja od kojih je abrazijsko trošenje najčešće. Ispitivanje trošenja može se provesti na različite načine.

Jedan je od tih načina ispitivanje abrazijskoga trošenja na uređaju *Taber abrader*.

Na intenzitet abrazijskoga trošenja utječe veličina i tvrdoća abrazivnoga zrna. U pravilu, što je abrazivno zrno veće i tvrđe, to je intenzitet abrazivnoga trošenja veći. Međutim, ova ovisnost nije jednoznačna i ne može se jednostavno definirati.

Kod svih metalnih materijala, s porastom abrazivnoga zrna do neke vrijednosti, količina potrošenoga materijala linearno raste. Nakon toga gubitak mase više ne raste na isti način. Može se smanjivati, ostati konstantan ili se i dalje povećavati, ali u manjoj mjeri. Ovaj fenomen poznat je pod pojmom kritična veličina abrazivnoga zrna.

Kritična veličina abrazivnoga zrna različita je za različite materijale. Ovisi o njihovoj mikrostrukturi i svojstvima.

U ovom radu određena je kritična veličina abrazivnoga zrna za aluminijsku leguru AA 2024-T351 i tehnički čisti aluminij.

Tehnički čisti aluminij ima monofaznu mikrostrukturu sastavljenu od  $\alpha$ -kristala. Aluminijska legura oznake AA 2024-T351 precipitacijski je očvrsnuta i osim kristala mješanaca u mikrostrukturi sadrži i sitne precipitate intermetalnoga spoja. Zbog toga ima znatno bolja mehanička svojstva od tehnički čistoga aluminija, prije svega veću čvrstoću i tvrdoću.

## 2. TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutoga tijela uslijed dinamičkoga dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. [1]

Trošenje je reakcija materijala na vanjski podražaj i može biti mehaničke i/ili kemijske prirode.

Brzinu trošenja povećava mehaničko djelovanje prisutnih stranih tijela i kemijsko agresivno djelovanje okoline. Posljedice trošenja su promjene geometrije površina uzajamno pokretnih dijelova. Istraživanja su pokazala kako je preko 50 % zastoja strojarskih sustava izazvano oštećenjima strojarskih pokretnih sklopova trošenjem. Sve vrste trošenja materijala, u većoj ili manjoj mjeri, ubrzava korozija. [2]

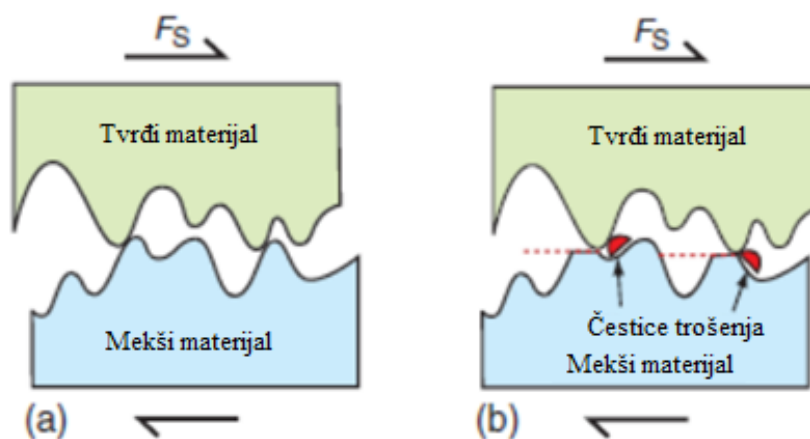
### 2.1. Mehanizmi trošenja

Iako postoje različiti načini trošenja, vrste trošenja dijelimo na četiri osnovna mehanizma trošenja materijala:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija.

### 2.2. Abrazija

Abrazija je najčešći mehanizam trošenja materijala. Nastaje kao posljedica prodiranja vrhova tvrdoga materijala u površinske slojeve mekšega materijala uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama, slika 1. Materijal abraziva može biti kamen, staklo, ugljen, cement, keramika i sl. Abrazivi su uglavnom mineralnoga podrijetla te se abrazija često zove i mineralno trošenje.

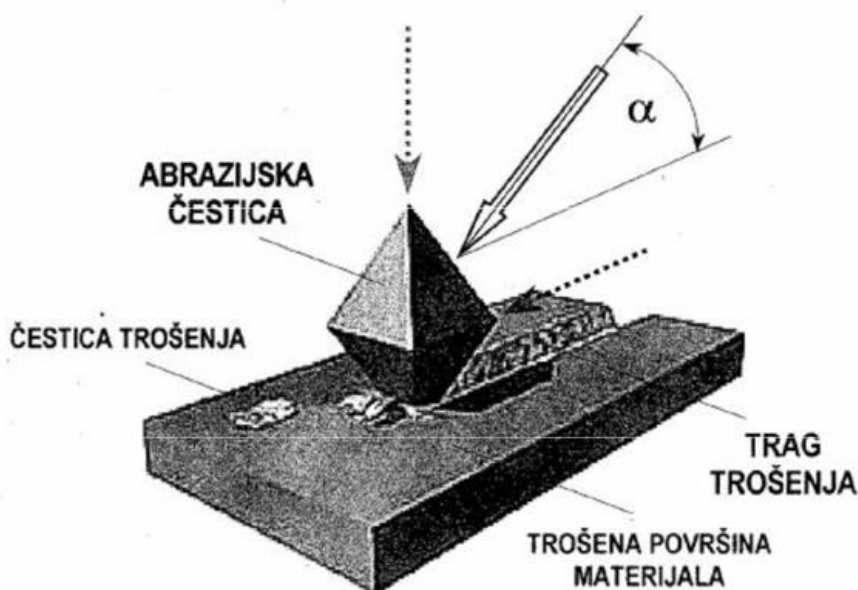


Slika 1. Abrazija [2]

### 2.2.1. Teorijska abrazija

Abrazija se, u teoriji, može prikazati kao proces mikrorezanja, tj. odvajanja čestica trošenja u mikropodručju. Često se koristi shematski prikaz mikrorezanja koji prikazuje pravilnu četverostranu piramidu koja, uz određenu silu i pod određenim kutom  $\alpha$ , djeluje na površinu trošenoga materijala. Materijal pravilne četverostrane piramide veće je tvrdoće od površine trošenoga materijala te zbog toga, prilikom djelovanja piramide na površinu trošenoga materijala, dolazi do odvajanja čestica trošenja i pojave traga trošenja.

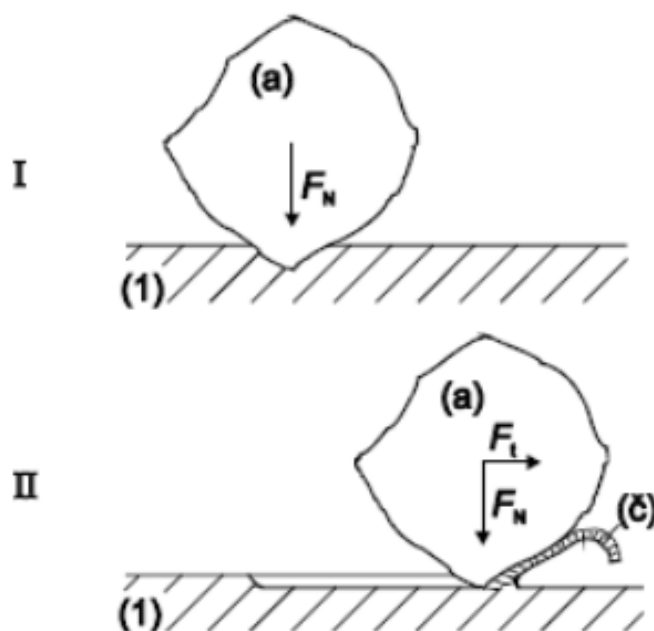
Slikovito je teorijski model abrazije prikazan na slici 2.



Slika 2. Teorijski model abrazije [3]

### 2.2.2. Realna abrazija

Mehanizme trošenja moguće je prikazati jediničnim događajima. Abrazijske čestice su u prirodi uglavnom nedefinirane geometrije. Abrazija se kao proces mikrorezanja može prikazati u dvjema fazama jediničnoga događaja, slika 3.



Slika 3. Jedinični događaj abrazije [1]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dviju faza:

- u prvoj fazi abraziv (a) prodire u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente sile  $F_N$
- u drugoj fazi dolazi do istiskivanja materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente sile  $F_t$ . [1]

### 2.2.2.1. Mehanizmi trošenja abrazijom

Mehanizam trošenja abrazijom najčešće se promatra sa sljedeća tri gledišta:

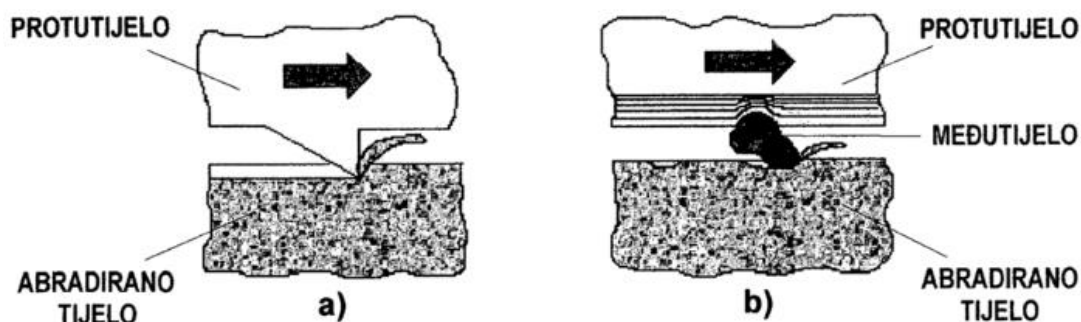
- prema međusobnom odnosu tijela u tribosustavu
- prema tvrdoći trošene površine i abraziva
- prema međusobnom djelovanju između abrazivskih čestica i trošene površine.

#### 1. Ovisno o međusobnom odnosu tijela u tribosustavu

- a) abrazija u dodiru dvaju tijela (engl. Two-Body Abrasion)- tribosustav se sastoji od abrazivnoga tijela i abrazivnoga protutijela
- b) abrazija u dodiru triju tijela (engl. Three-Body Abrasion)- tribosustav se sastoji od abrazivnoga tijela, abrazivnoga protutijela i slobodnih čestica (međutijela). Te se čestice slobodno gibaju između abrazivnoga tijela i abrazivnoga protutijela djelujući abrazijski.

Do znatno više odvojenih čestica trošenja dolazi kod abrazije u dodiru dvaju tijela nego kod abrazije u dodiru triju tijela.

Kod abrazije u dodiru triju tijela čestice abrazije samo su oko 10 % vremena u dodiru s abrazivnim tijelom, dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru, slika 4.

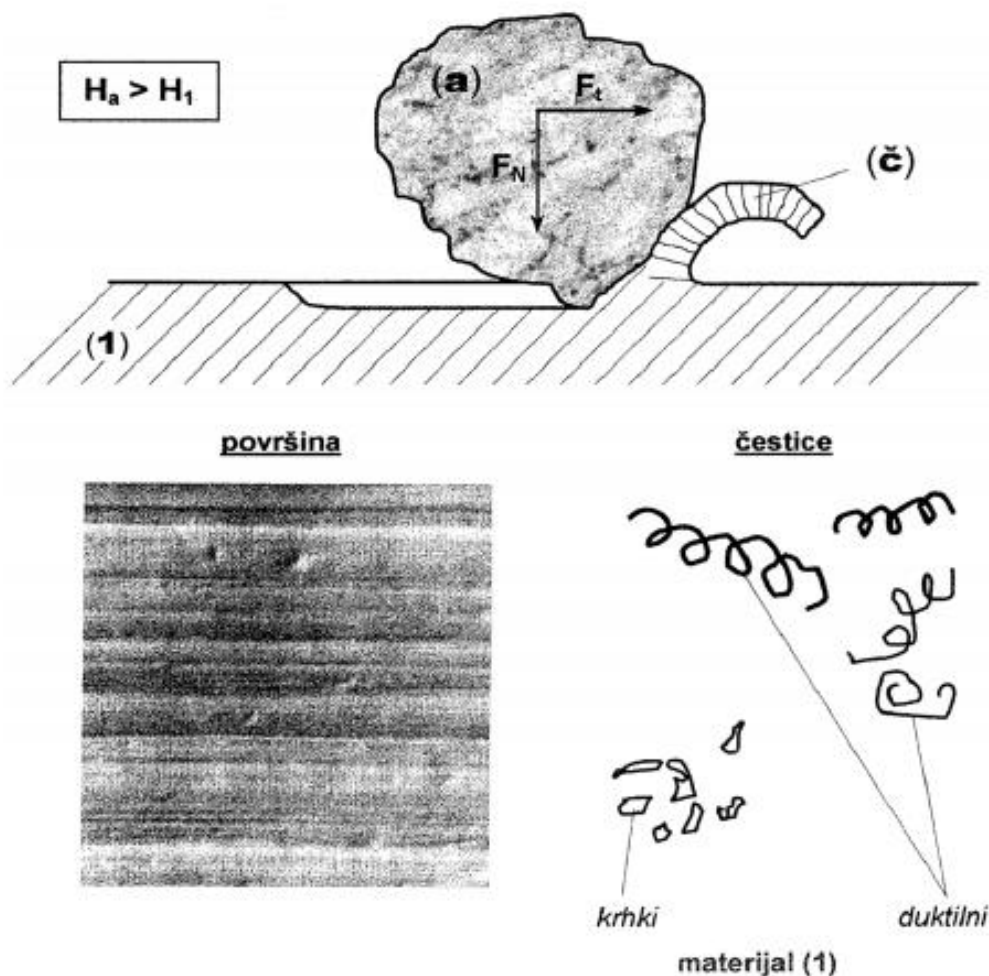


Slika 4. Abrazija u dodiru dvaju tijela (a) i triju tijela (b) [4]

## 2. Odnos tvrdoća trošene površine i abraziva

- a) čista abrazija – tvrdoća abraziva (a),  $H_a$ , veća je od tvrdoće površine abradiranoga materijala (1),  $H_1$ . Također je riječ o čistoj abraziji u slučaju da je trošena površina višefazna i da je tvrdoća abraziva veća od svih faza od kojih se površina sastoji. Nakon abrazije trošena je površina izbrazdana, dok su čestice trošenja (č) oblika spiralnih strugotina kada je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine kada je abradirani materijal krhki.

Na slici 5 shematski je prikazana čista abrazija, izgled trošene površine i oblik čestica trošenja.



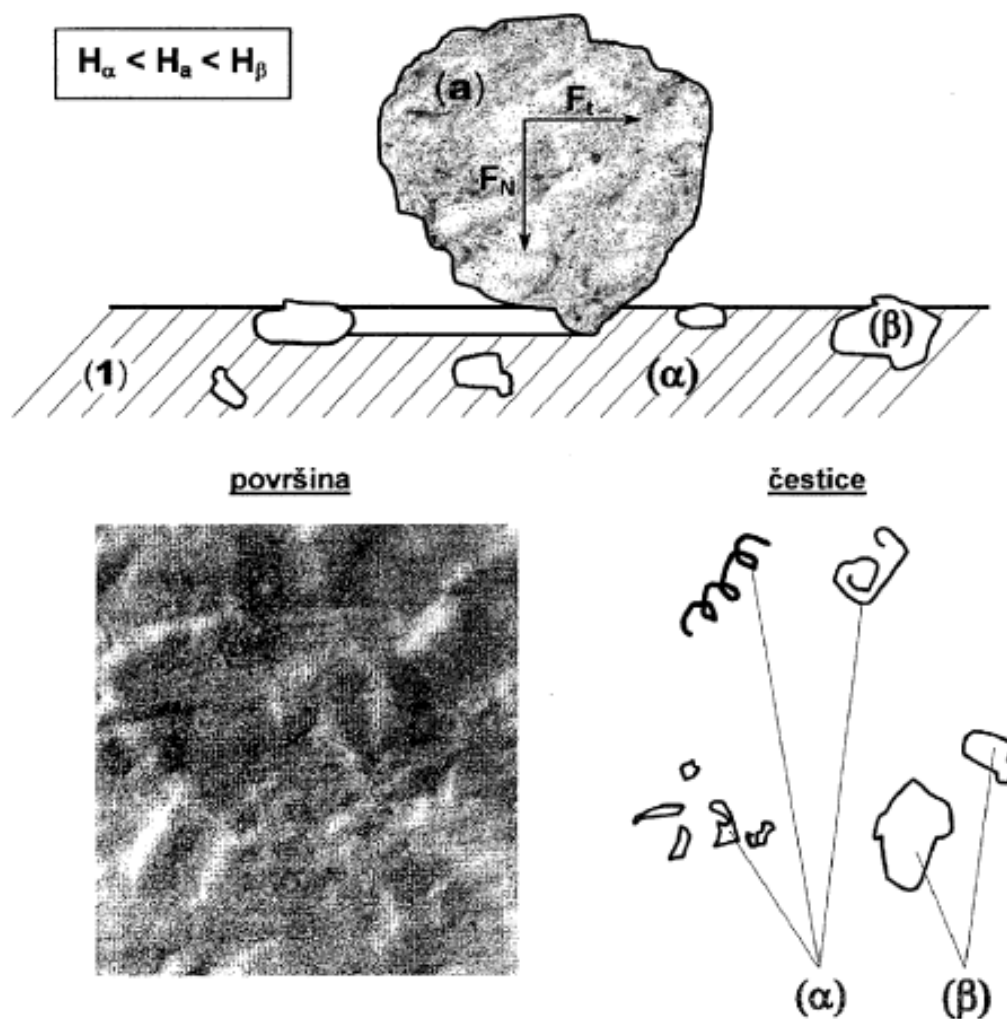
Slika 5. Čista abrazija [1]



- b) selektivna abrazija – tvrdoća abraziva (a),  $H_a$ , veća je od tvrdoće faze ( $\alpha$ ),  $H_\alpha$ , i manja od tvrdoće faze  $\beta$ ,  $H_\beta$ , površinskoga sloja abradiranoga materijala.

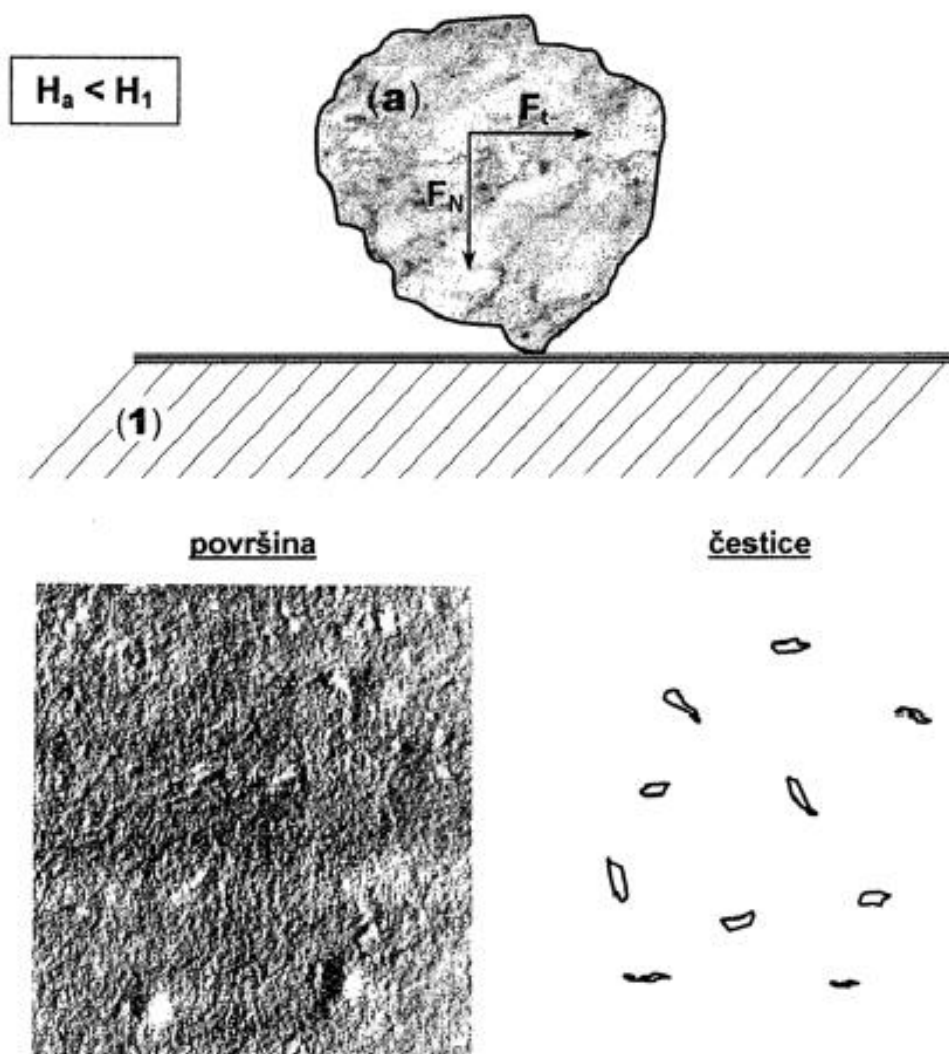
Na trošenoj površini dolazi do pojave brazda na mjestima faza manje tvrdoće, dok će se faze veće tvrdoće povremeno otkidati zbog „potkopavanja“ abraziva.

Na slici 6 shematski je prikazana selektivna abrazija, izgled trošene površine i oblik čestica trošenja.



Slika 6. Selektivna abrazija [1]

- c) nulta abrazija– tvrdoća abraziva ( $a$ ),  $H_a$ , manja je od tvrdoće abradirane površine (1),  $H_1$ . Čestice trošenja su sitne ljuske koje potječu od vanjskoga graničnog sloja na površini (sloj oksida, prljavštine ili adsorbiranih plinova). Na slici 7 shematski je prikazana nulta abrazija, izgled trošene površine i oblik čestica trošenja.

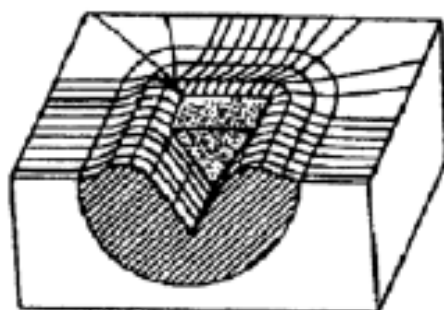


Slika 7. Nulta abrazija [1]

### 3. Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazivskih čestica i trošene površine

- a) mikrobrazdanje – odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazivske čestice. Abradirani materijal potisnut je u stranu u obliku bočnih grebena, tj. nema čestica trošenja.

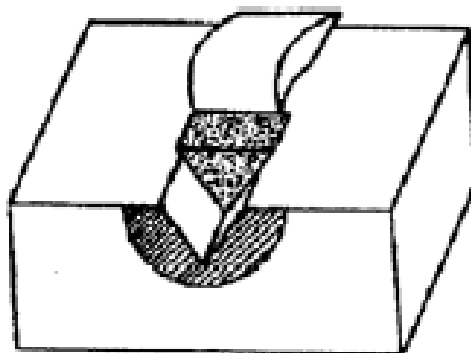
Na slici 8 shematski je prikazan oblik mikrobrazde i plastična deformacija materijala kod mikrobrazdanja.



**Slika 8. Mikrobrazdanje [4]**

- b) mikrorezanje – odnošenje materijala jednako volumenu zareza nastalog prolaskom abrazivne čestice.

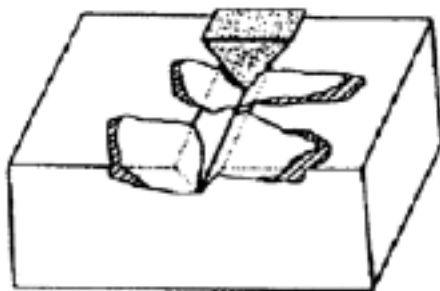
Na slici 9 shematski je prikazan oblik trošenja kod mikrorezanja.



**Slika 9. Mikrorezanje [4]**

- c) mikronaprsnuća – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja pukotina. Čestice trošenja malo su veće nego kod ostalih vrsta mikrotrošenja.

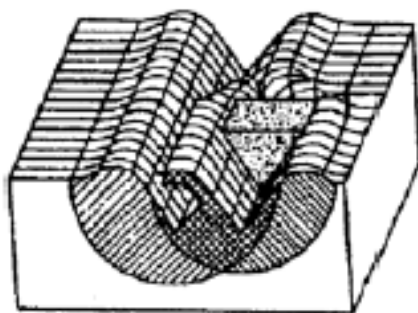
Na slici 10 shematski je prikazano mikronaprsnuće i čestice trošenja koje pri tom nastaju.



**Slika 10. Mikronaprsnuća [4]**

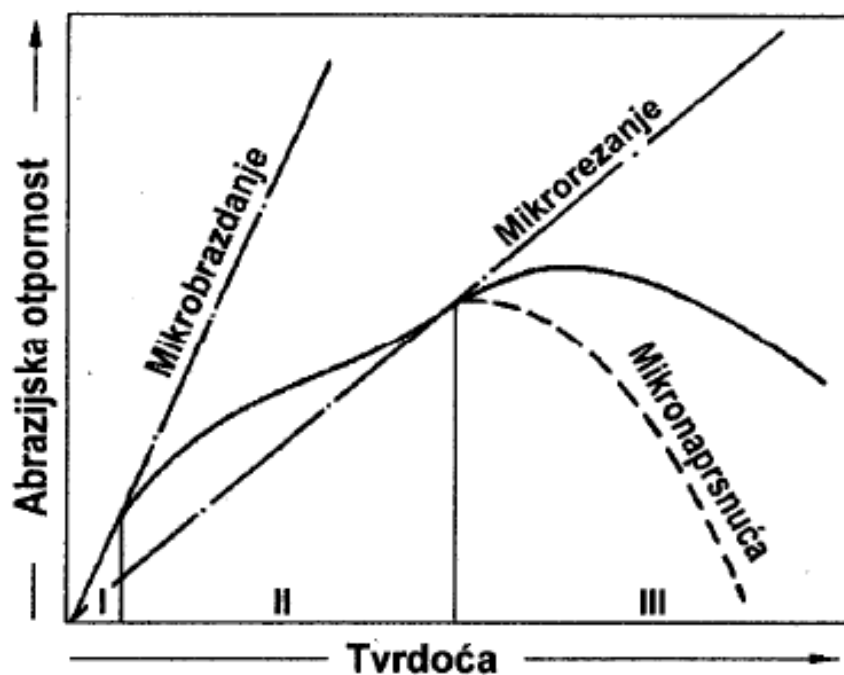
- d) mikroumor – odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalo učestalim izmjeničnim opterećenjem. Materijal je izložen trenutnim deformacijama uslijed čega nastaju mikropukotine koje se zatim šire i koje u konačnici uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine.

Na slici 11 shematski je prikazana deformacija materijala koja nastaje pri procesu mikroumora.



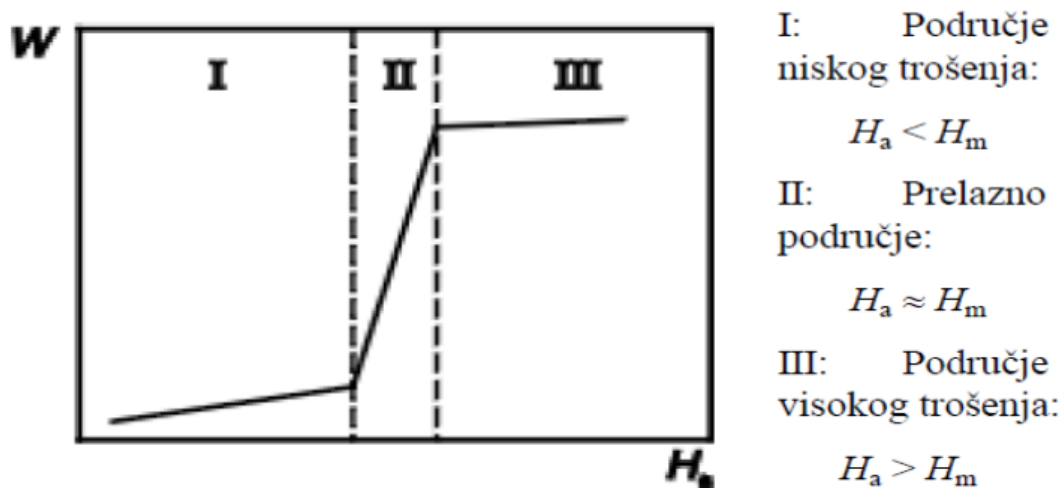
**Slika 11. Mikroumor [4]**

Jedan je od najutjecajnijih čimbenika abrazijskoga trošenja tvrdoća trošenoga materijala. Ukoliko je tvrdoća materijala veća, to je i njegova abrazijska otpornost veća. Ovisnost otpornosti abrazijskom trošenju o tvrdoći materijala prilikom različitih tipova mikrotrošenja prikazana je na slici 12.



Slika 12. Ovisnost otpornosti abrazijskom trošenju o tvrdoći materijala [5]

Još je jedan važan čimbenik odnos tvrdoće abraziva i trošenoga materijala. Ovisnost abrazijskoga trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala prikazana je na slici 13, gdje su  $H_a$  tvrdoća abraziva,  $W$  intenzitet trošenja te  $H_m$  tvrdoća trošenoga materijala.



Slika 13. Ovisnost abrazijskoga trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [6]

### 2.3. Kritična veličina abrazivnog zrna

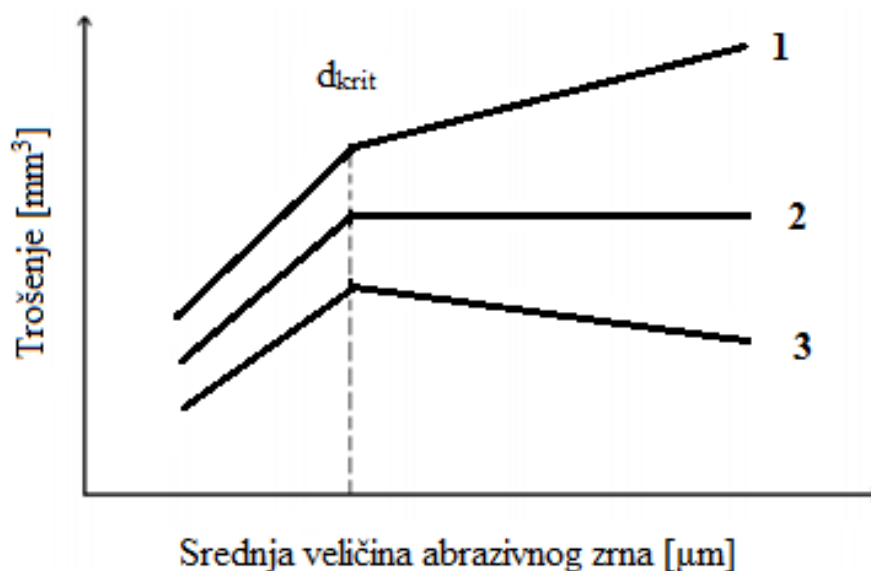
Kritična veličina abrazivnog zrna vrlo je bitan čimbenik pri trošenju materijala. Ovaj fenomen pojavljuje se kod abrazije u dodiru dvaju tijela, abrazije u dodiru triju tijela, eroziji i procesima obrade odvajanjem čestica. Prema literaturi, veličina abrazivnog zrna povezana je linearno s gubitkom mase trošenoga materijala sve do kritične veličine abrazivnog zrna  $d_{krit}$  (CPS – critical particle size), slika 14. Nakon dosegnute kritične veličine abrazivnog zrna gubitak mase više ne raste na isti način.

Moguće su tri promjene (ne moraju biti linearne):

Slučaj 1 – gubitak mase se nakon dosegnute kritične veličine abrazivnog zrna i dalje povećava, ali u manjoj mjeri

Slučaj 2 – nakon dosegnute kritične veličine abrazivnog zrna gubitak mase ostaje konstantan

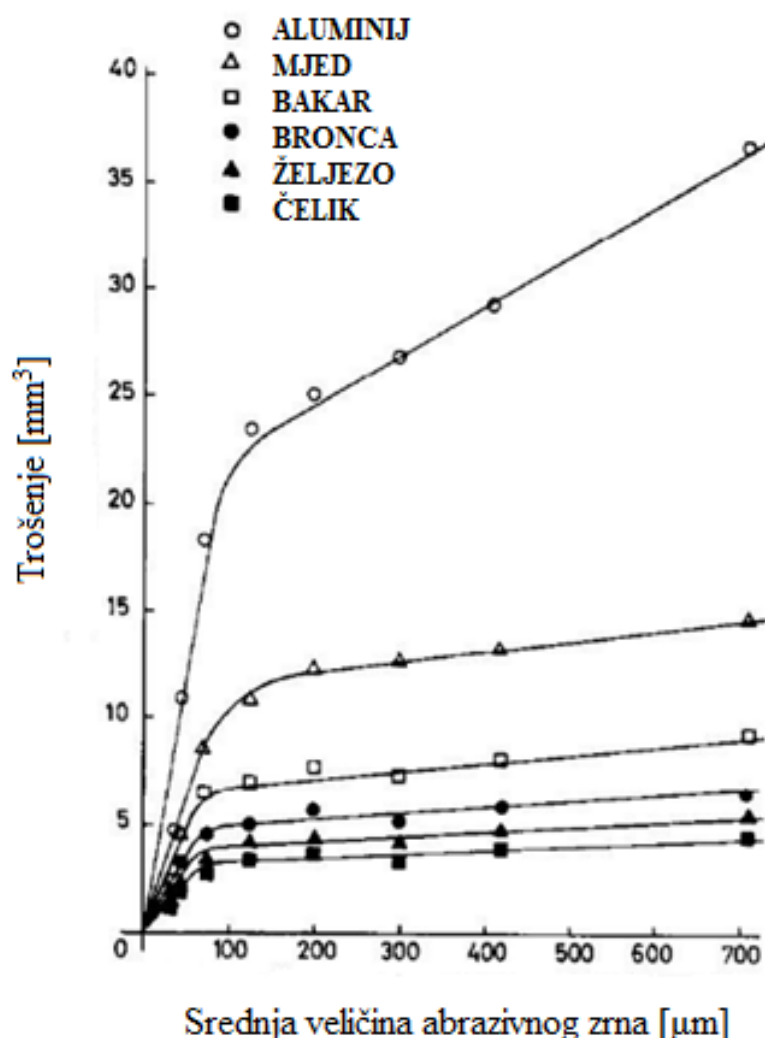
Slučaj 3 – gubitak mase se nakon dosegnute kritične veličine abrazivnog zrna smanjuje.



Slika 14. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsko trošenje materijala [7]

Postoje mnoge hipoteze koje objašnjavaju ovaj fenomen, no nijednu nije prihvatila cijela znanstvena zajednica. Znanstvenici G.K. Nathan i W.J.D. Jones [8] proveli su ispitivanje utjecaja veličine abrazivnog zrna na gubitak mase trošenoga materijala kod abrazije u dodiru dvaju tijela. Jedan od materijala ispitivanja bio je aluminij, a materijal abraziva bio je SiC.

Na slici 15 prikazani su rezultati njihova ispitivanja. Uočljiv je linearni rast kod svih materijala sve do veličine abrazivnog zrna od 70  $\mu\text{m}$ . Između 70 i 150  $\mu\text{m}$  dolazi do pada nagiba krivulja, a nakon 150  $\mu\text{m}$  ponovno dolazi do linearnosti s manjim nagibom nego prije kritične veličine abrazivnog zrna.



Slika 15. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na gubitak mase trošenoga materijala [8]



### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Osnovni je cilj rada ispitivanje abrazijskoga trošenja Al-legure AA 2024-T351 i tehnički čistoga aluminijskog te odrediti kritičnu veličinu abrazijskoga zrna. Ispitivanje abrazijskoga trošenja provedeno je na uređaju *Taber abrader* u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanja su provedena na brusnom papiru različitih granulacija s abrazivnim česticama od aluminijskoga oksida  $Al_2O_3$ .

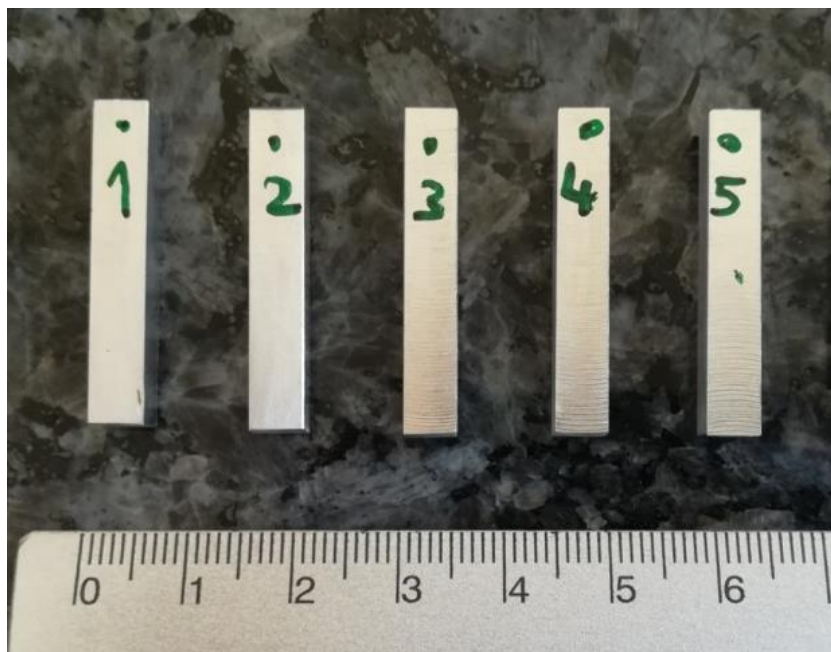
Intenzitet trošenja određen je mjerenjem gubitka mase. Kako su uspoređivana dva materijala različite gustoće, gubitak mase preračunat je u gubitak volumena. Otpornost materijala na trošenje, tj. intenzitet trošenja, izražava se gubitkom volumena svedenoga na veličinu poprečnoga presjeka trošene površine uzoraka. Nakon provedenoga ispitivanja dobiveni rezultati su analizirani i međusobno uspoređeni.

#### 3.2. Materijali za ispitivanje

Ispitivanje abrazijskoga trošenja provedeno je na dvije skupine uzoraka. Prva skupina izrezana je iz dijela stajnoga trapa zrakoplova izrađenoga od Al-legure AA 2024-T351, prikazanoga na slici 16. Uzorci prve skupine prikazani su na slici 17.



Slika 16. Dio stajnoga trapa zrakoplova



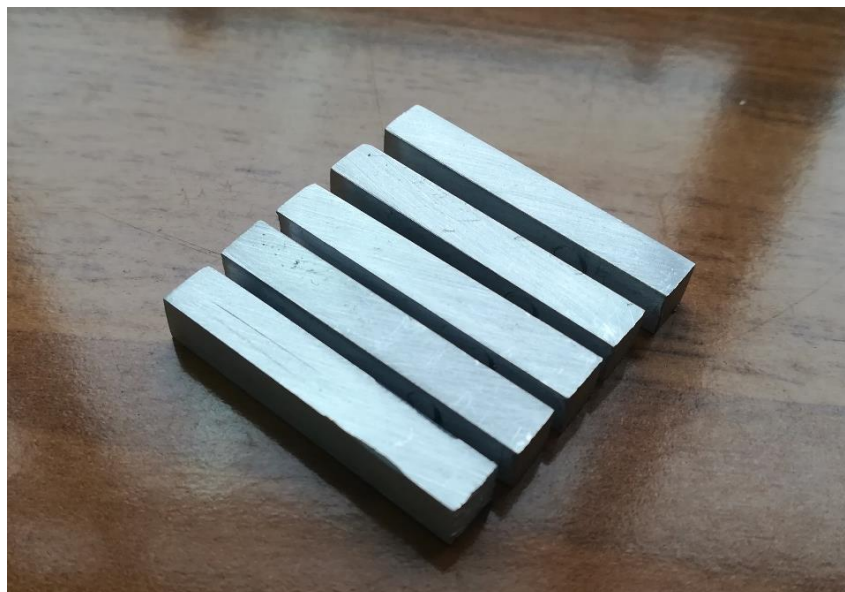
**Slika 17. Uzorci prve skupine prije ispitivanja**

Druga skupina uzoraka izrezana je aluminijskoga valjka promjera 45 mm, prikazanoga na slici 18.

Na slici 19 prikazani su uzorci druge skupine prije ispitivanja.



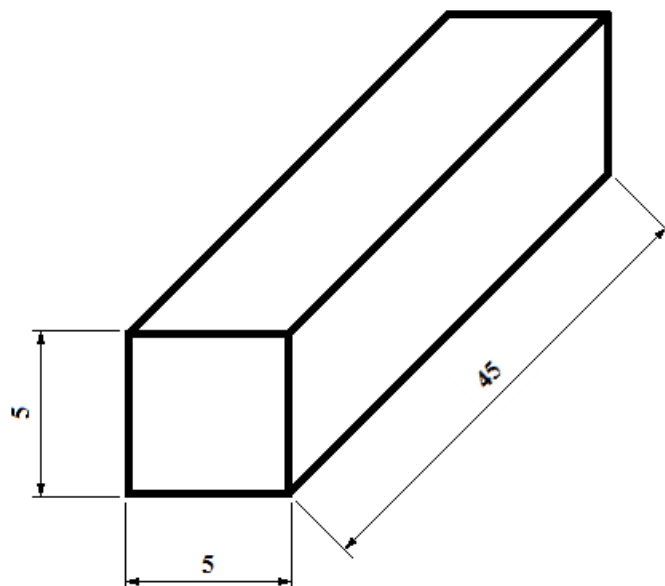
**Slika 18. Aluminijski valjak iz kojega su izrezani uzorci druge skupine**



**Slika 19. Uzorci druge skupine prije ispitivanja**

U svakoj skupini bilo je po pet uzoraka. Geometrija uzoraka prikazana je na slici 20.

Ispitni uzorci izrezani su u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



**Slika 20. Geometrija ispitnih uzoraka**

Kemijski sastav Al-legure AA 2024-T351 prikazan je u tablici 1, a fizikalna i mehanička svojstva legure u tablici 2.

**Tablica 1. Kemijski sastav aluminijske legure AA 2024-T351 [9]**

Kemijski element	Al	Cu	Mg	Mn	Si max	Fe max	Zn max	Ti max	Cr max	Ostalo
Udio, %	90,7	3,8	1,2	0,3	0,5	0,5	0,25	0,15	0,1	0,15
	-	-	-	-						
	94,7	4,9	1,8	0,9						

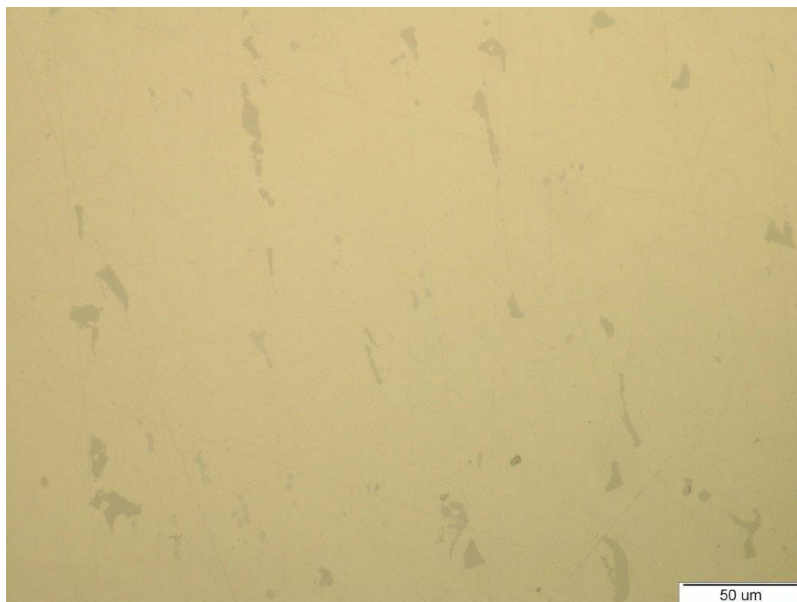
**Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure AA 2024-T351 [9]**

gustoća	kg/m <sup>3</sup>	2780
talište	°C	520...638
modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	73100
granica razvlačenja	N/mm <sup>2</sup>	324
vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	469
istezljivost	%	20

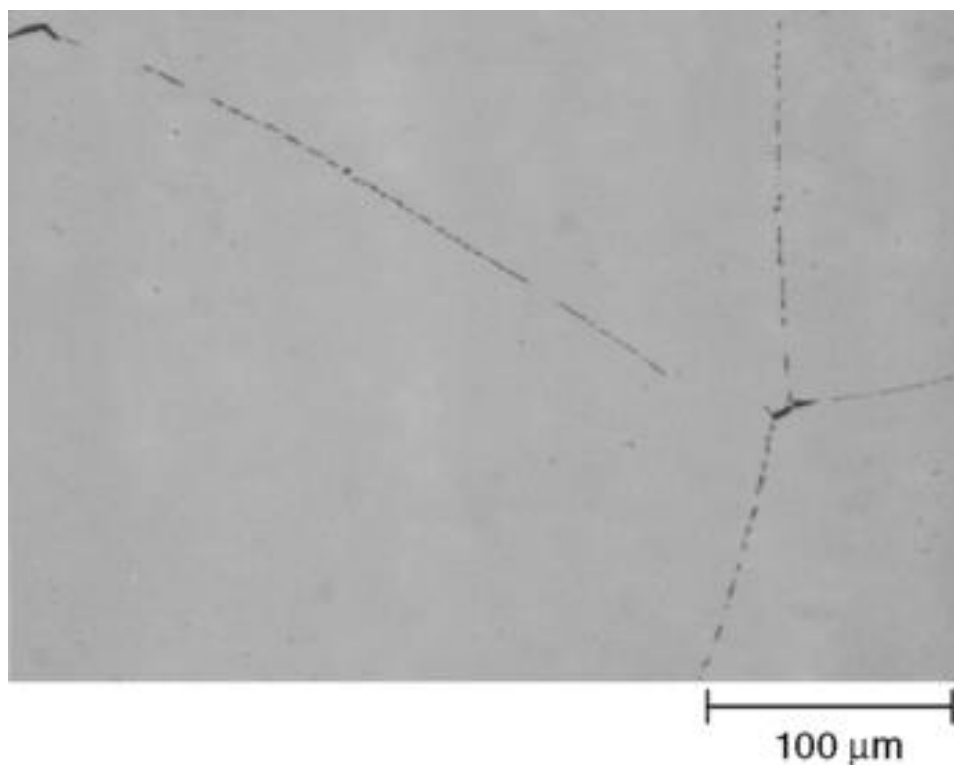
**Tablica 3. Fizikalna i mehanička svojstva tehnički čistoga aluminija [10]**

gustoća	kg/m <sup>3</sup>	2700
talište	°C	660
modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	69000
granica razvlačenja	N/mm <sup>2</sup>	20...120
vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	40...180
istezljivost	%	50...4

Mikrostrukture oba ispitivana materijala prikazane su na slikama 21 i 22. U sastavu Al-legure AA 2024-T351 osim kristala mješanca mogu se uočiti nakupine druge faze – intermetalnoga spoja. Kod tehnički čistoga aluminija vidi se monofazna mikrostruktura s istaknutim granicama zrna.



**Slika 21. Mikrostruktura aluminijske legure AA 2024-T351**



**Slika 22. Mikrostruktura tehnički čistoga aluminija [11]**

### 3.3. Rezultati ispitivanja

Ispitni uzorci su prije ispitivanja ručno brušeni zbog skidanja sloja nečistoća. Nakon toga uzorcima su pomoću pomične mjerke izmjerene dimenzije poprečnoga presjeka.

Masa ispitnih uzoraka izmjerena je na uređaju *OHAUS Analytical Plus* (točnost na pet decimala) u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Uređaj za mjerenje mase prikazan je na slici 23.



Slika 23. Uređaj za mjerenje mase *OHAUS Analytical Plus*



Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je na uređaju *Taber abrader* u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Uređaj za abrazijsko trošenje s ispitnim uzorkom i abrazivnim papirom prikazan je na slici 24.



**Slika 24.** Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje *Taber abrader*

Promjer abrazivnoga diska je 125 mm, brzina vrtnje je 1 o/s, a obodna brzina je 0,251 m/s. Uzorci su pri ispitivanju pritisnuti na brusni papir silom od 4,91 N.

Svaki uzorak podvrgnut je trošenju pri 400 okretaja što odgovara duljini od  $\approx 100$  m, za svaku kvalitetu brusnoga papira.

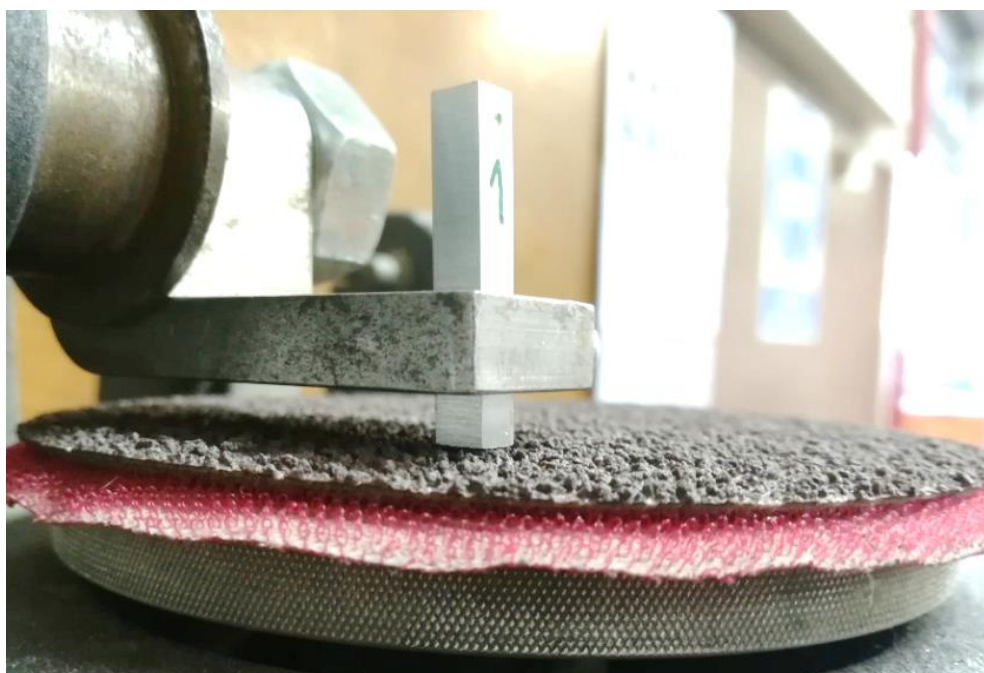
Abrazijsko trošenje provedeno je na brusnim papirima različitih granulacija. Materijal abrazivnih čestica brusnih papira je aluminijev oksid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Navedeni brusni papiri su fleksibilni, promjera 115 mm i namijenjeni obradi metala u suhim i mokrim uvjetima.

Brusni papiri su prikazani na slici 25.

Na slici 26 prikazan je uzorak postavljen u nosaču uzoraka prije samoga ispitivanja.



**Slika 25. Brusni papiri**



**Slika 26. Uzorak pripremljen za abrazijsko trošenje**



U tablici 4 prikazana je usporedba kvalitete i srednjega promjera abrazivnoga zrna korištenih brusnih papira.

**Tablica 4. Usporedba kvalitete brusnoga papira i srednjega promjera abrazivnoga zrna**

Broj uzorka	Kvaliteta brusnoga papira (ISO/FEPA)	Srednji promjer abrazivnoga zrna [ $\mu\text{m}$ ]
1	P80	201
2	P120	125
3	P180	82
4	P240	58,5
5	P600	25,8

Nakon provedenoga abrazijskog trošenja uzorcima je ponovno izmjerena masa te dimenzije poprečnoga presjeka.

U tablici 5 prikazane su veličine poprečnih presjeka abradiranih površina.

U tablici 6 prikazan je gubitak mase pri ispitivanju abrazije nakon 400 okretaja abrazijskoga diska na *Taber abraderu*.

**Tablica 5. Veličine poprečnih presjeka abradiranih površina**

Kvaliteta brusnoga papira (ISO/FEPA)	Al-legura AA 2024-T351 A [ $\text{mm}^2$ ]	Tehnički čisti aluminij A [ $\text{mm}^2$ ]
P80	24,525	25,376
P120	24,647	23,711
P180	24,800	25,296
P240	25,050	23,863
P600	25,326	23,715

**Tablica 6. Gubitak mase pri ispitivanju**

Kvaliteta brusnoga papira (ISO/FEPA)	Al-legura AA 2024-T351 $\Delta m$ [g]	Tehnički čisti aluminij $\Delta m$ [g]
P80	0,02195	0,08532
P120	0,02604	0,05732
P180	0,02329	0,05508
P240	0,02085	0,04257
P600	0,01343	0,02157

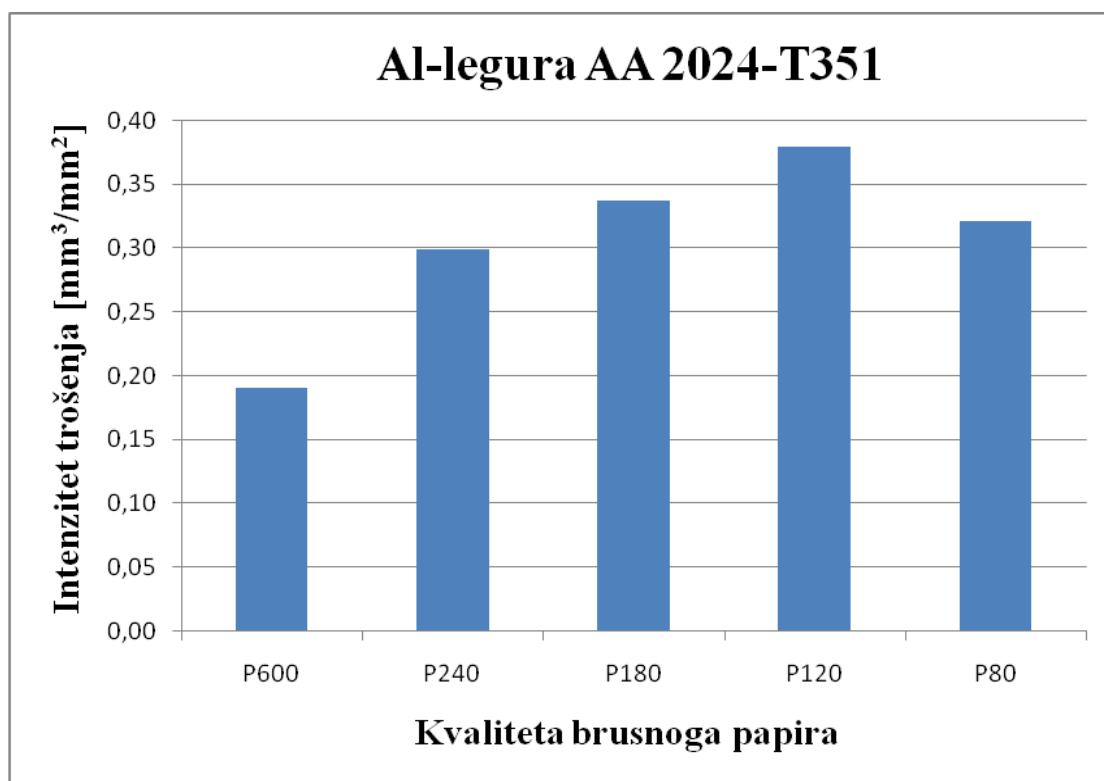
S obzirom na to da Al-legura AA 2024-T351 i tehnički čisti aluminij imaju različitu gustoću, gubitak mase preračunat je u gubitak volumena. U tablici 7 prikazan je gubitak volumena za oba ispitivana materijala za sve kvalitete brusnoga papira.

**Tablica 7. Gubitak volumena pri ispitivanju**

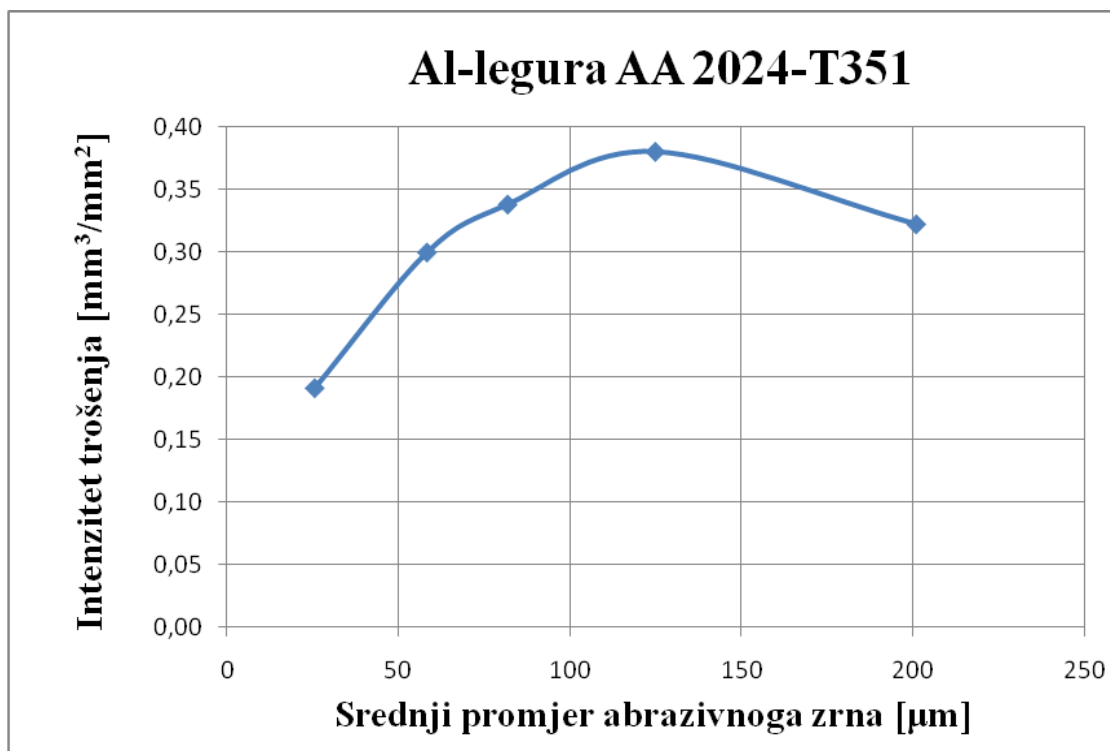
Kvaliteta brusnoga papira (ISO/FEPA)	Al-legura AA 2024-T351 $\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	Tehnički čisti aluminij $\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]
P80	7,896	31,600
P120	9,367	21,230
P180	8,378	20,400
P240	7,500	15,760
P600	4,831	7,980

Intenzitet trošenja Al-legure AA 2024-T351 za različite kvalitete brusnoga papira prikazan je grafički na slici 27.

Ovisnost intenziteta trošenja Al-legure AA 2024-T351 o veličini abrazivnih zrna prikazana je grafički na slici 28.



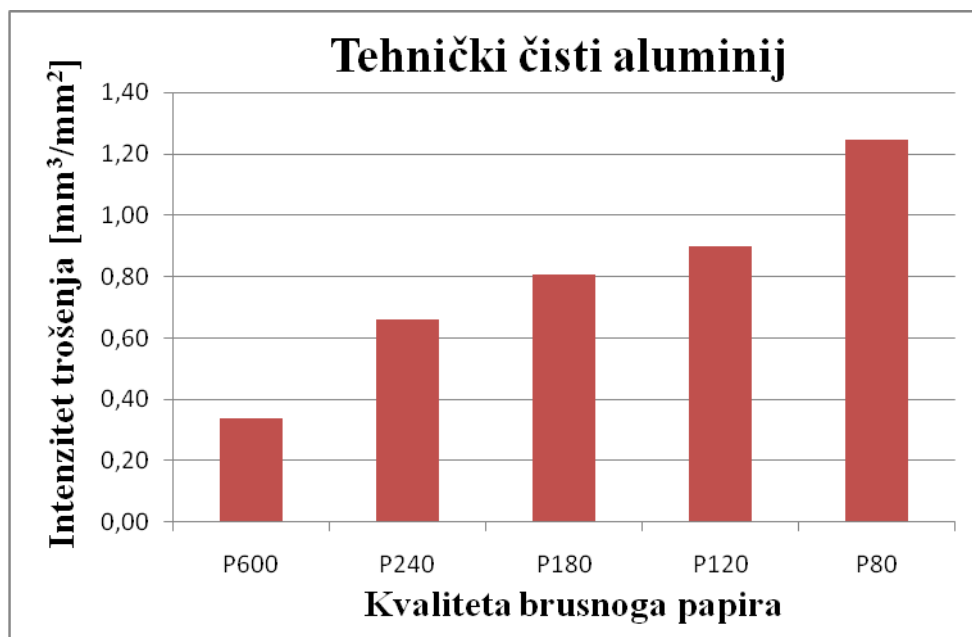
Slika 27. Intenzitet trošenja Al-legure AA 2024-T351



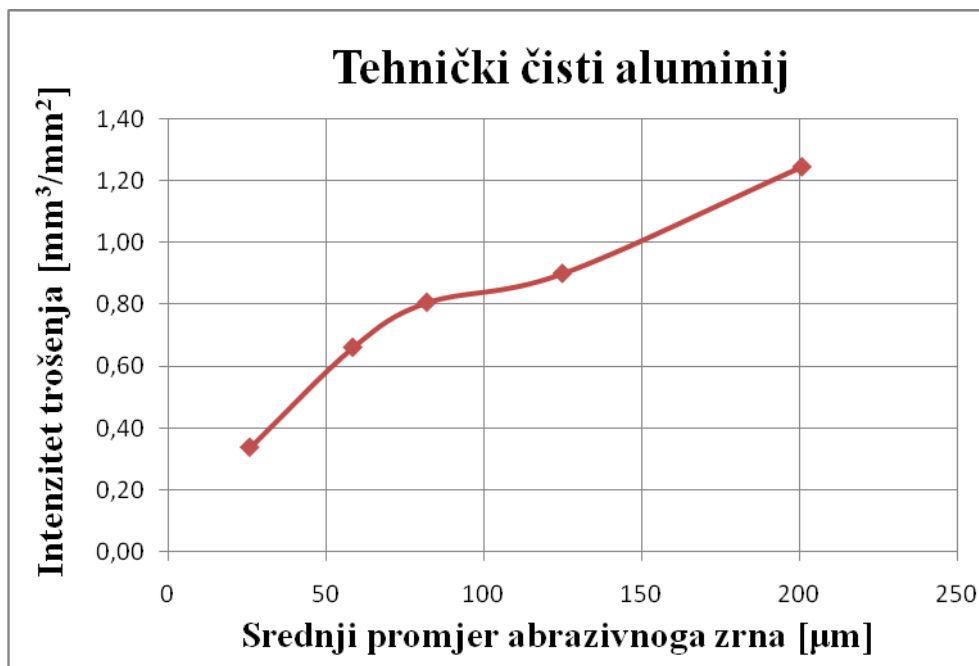
Slika 28. Ovisnost intenziteta trošenja Al-legure AA 2024-T351 o srednjem promjeru abrazivnoga zrna

Intenzitet trošenja tehnički čistoga aluminija za različite kvalitete brusnoga papira prikazan je grafički na slici 29.

Ovisnost intenziteta trošenja tehnički čistoga aluminija o veličini abrazivnih zrna prikazana je grafički na slici 30.



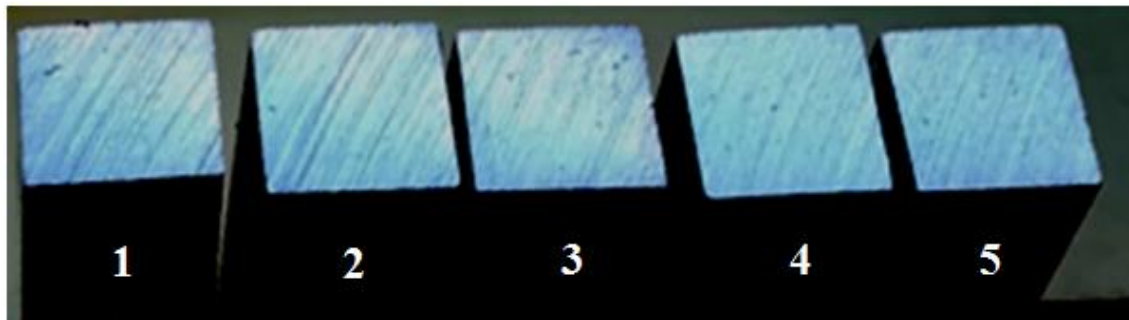
Slika 29. Intenzitet trošenja tehnički čistoga aluminija



Slika 30. Ovisnost intenziteta trošenja tehnički čistoga aluminija o srednjem promjeru abrazivnoga zrna

Trošene površine skupine uzoraka Al-legure AA 2024-T351 prikazane su na slici 31. Tragovi trošenja mogu se vrlo lijepo uočiti. Najveći tragovi trošenja vidljivi su na drugom uzorku koji je bio podvrgnut trošenju pomoću abrazivnoga papira srednjega promjera abrazivnoga zrna od 125  $\mu\text{m}$ .

Uzorci nakon provedenoga ispitivanja prikazani su na slici 32.



Slika 31. Površine skupine uzoraka Al-legure AA 2024-T351 nakon ispitivanja

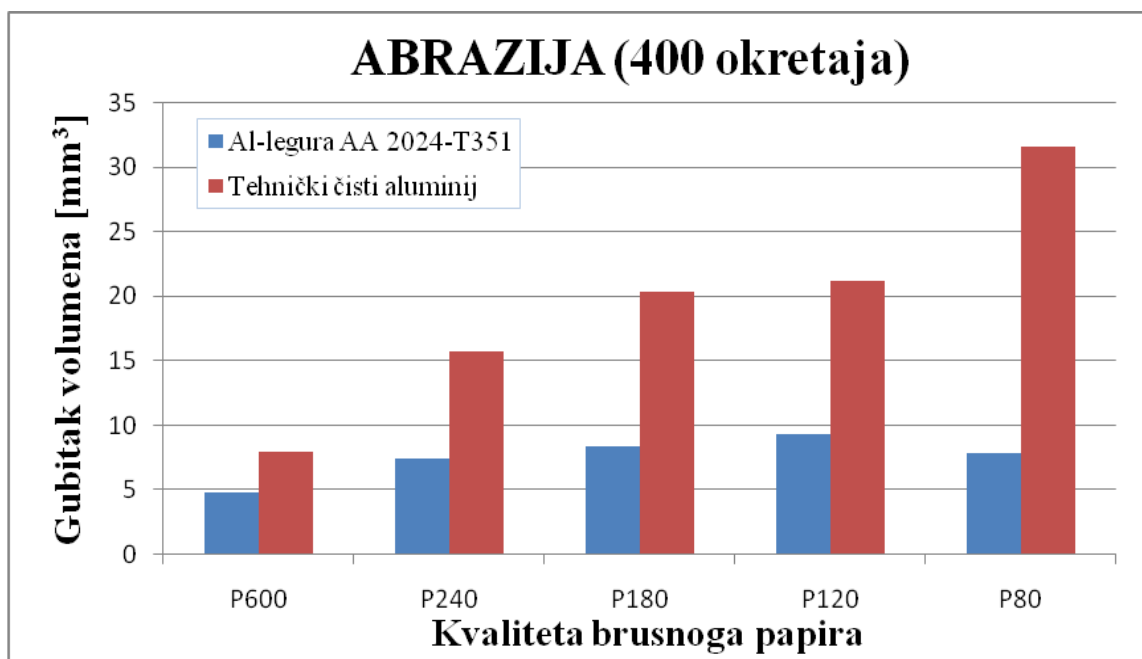


Slika 32. Uzorci nakon ispitivanja

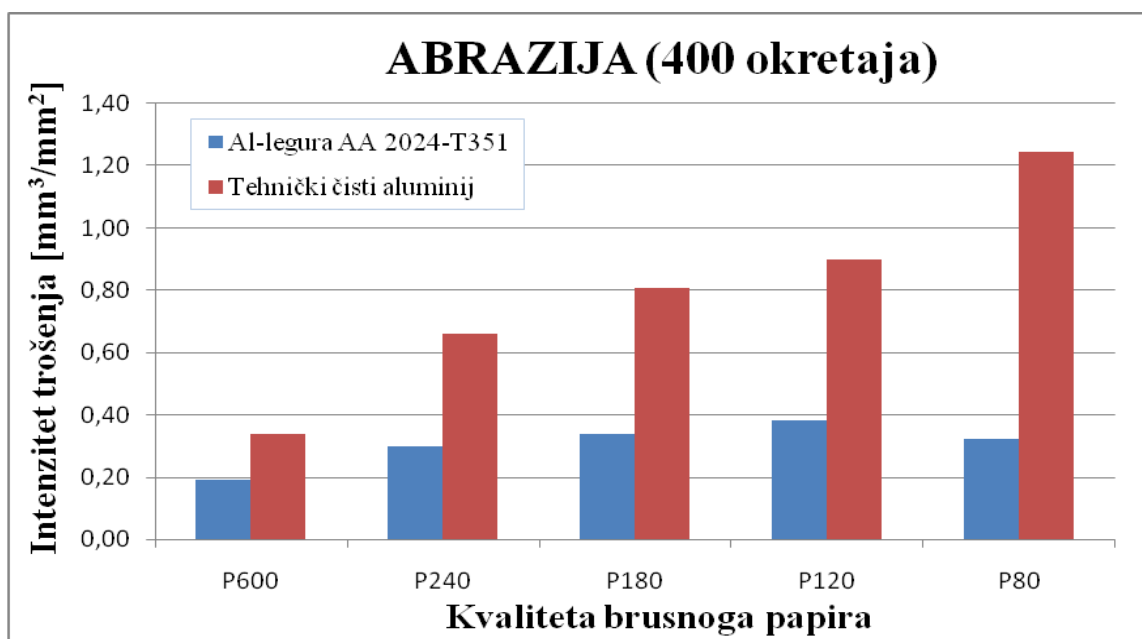
### 3.4. Analiza rezultata

Usporedba gubitka volumena pri abrazijskom trošenju oba ispitivana materijala, za različite kvalitete brusnoga papira, prikazana je grafički na slici 33.

Usporedba intenziteta trošenja oba ispitivana materijala, za različite kvalitete brusnoga papira, prikazana je grafički na slici 34.



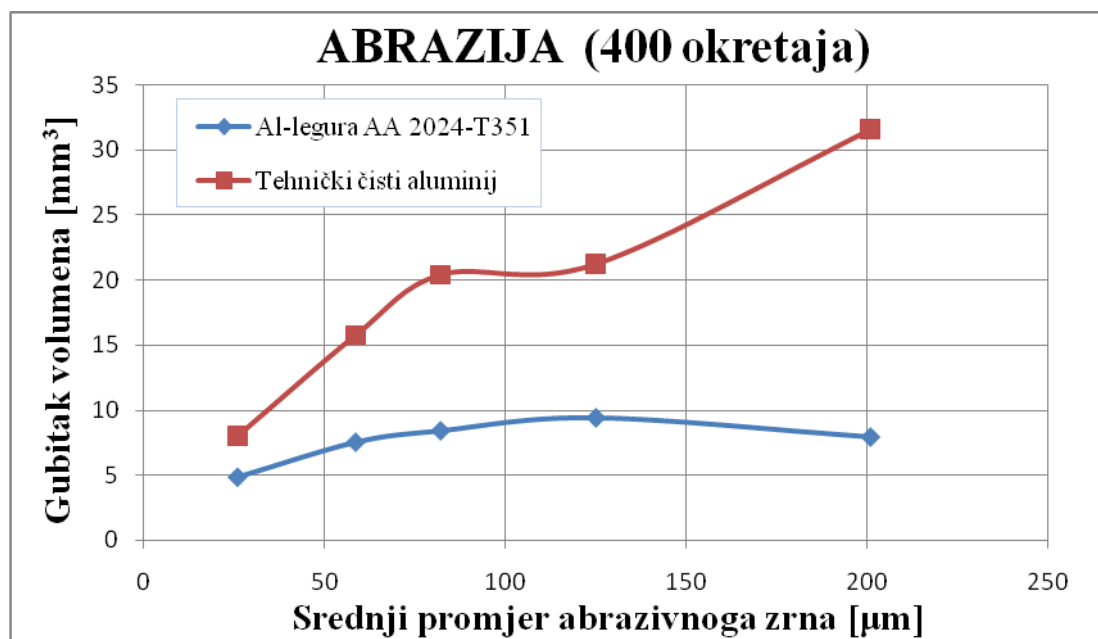
Slika 33. Gubitak volumena oba ispitivana materijala za različite kvalitete brusnoga papira



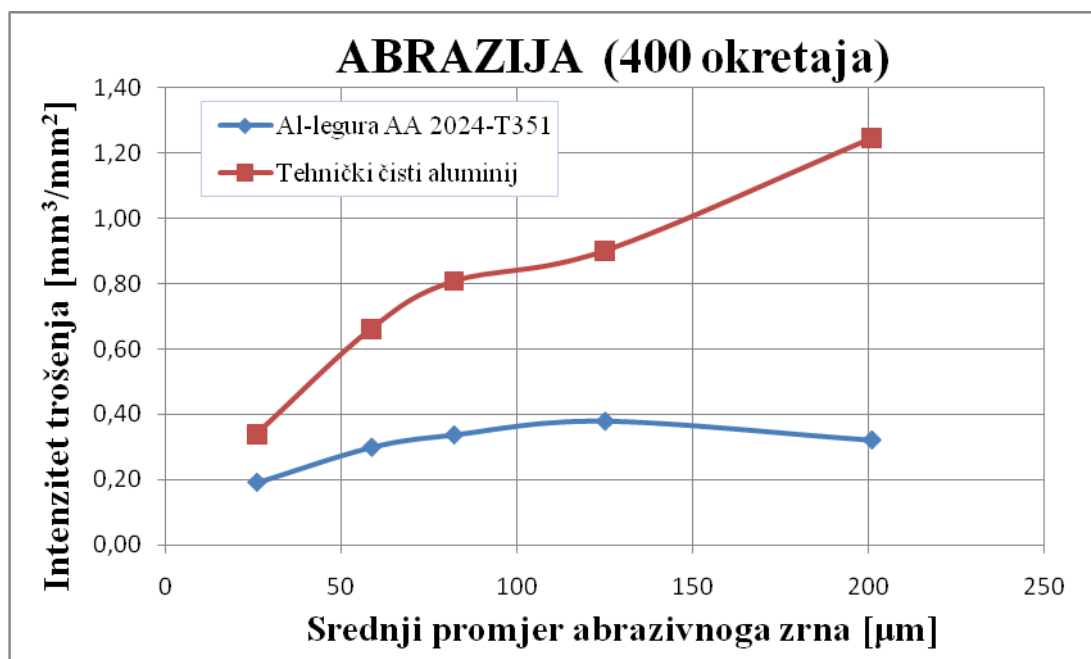
Slika 34. Intenzitet trošenja oba ispitivana materijala za različite kvalitete brusnoga papira

Usporedba gubitka volumena pri abrazijskom trošenju oba ispitivana materijala, za različite srednje promjene abrazivnoga zrna, prikazana je grafički na slici 35.

Usporedba intenziteta trošenja oba ispitivana materijala, za različite srednje promjene abrazivnoga zrna, prikazana je grafički na slici 36.



Slika 35. Gubitak volumena oba ispitivana materijala za različite srednje promjene abrazivnoga zrna



Slika 36. Intenzitet trošenja oba ispitivana materijala za različite srednje promjere abrazivnoga zrna

Iako se dijagrami na slikama 35 i 36 vrlo malo razlikuju, bitno je istaknuti da veličina trošene površine ima utjecaj na intenzitet trošenja te da se ne smije zanemariti pri iskazivanju rezultata.

Kod oba ispitivana materijala izražen je fenomen kritične veličine abrazivnoga zrna, slika 35. Kod Al-legure AA 2024-T351 kritična veličina abrazivnoga zrna iznosi  $\approx 125 \mu\text{m}$ . Kod tehnički čistoga aluminija kritična veličina abrazivnoga zrna nešto je manja i iznosi  $\approx 82 \mu\text{m}$ .

U literaturi [7] je ovaj fenomen objašnjen pomoću promjene dominantnoga mikro mehanizma trošenja. Do navedene promjene dolazi zbog različite veličine abrazivnih zrna. Kod sitnijih abrazivnih čestica rezne oštrice imaju manji kut i dominantni mehanizam trošenja je mikrorezanje. Kod većih abrazivnih čestica kutovi rezanja su veći i dominantni mehanizam trošenja je mikrobrazdanje.

Kritična se veličina abrazivnoga zrna kod oba ispitivana materijala razlikuje zbog različite mikrostrukture i svojstava, prije svega tvrdoće.

Tehnički čisti aluminij mekši je i lakše se plastično deformira od Al-legure AA 2024-T351. Al-legura AA 2024-T351, za razliku od monofazne mikrostrukture tehnički čistoga aluminija, u mikrostrukтури sadrži nakupine intermetalnoga spoja što joj povećava tvrdoću i otpornost na plastičnu deformaciju.



## 4. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenoga ispitivanja i pri tom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Veličina abrazivnih čestica ima veliki utjecaj na intenzitet trošenja tehnički čistoga aluminija i Al-legure AA 2024-T351.
- Kod oba ispitivana materijala izražena je kritična veličina abrazivnoga zrna.
- Tehnički čisti aluminij više se troši od Al-legure AA 2024-T351 zbog različite mikrostrukture i svojstava.
- Al-legura ima veću vrijednost kritične veličine abrazivnoga zrna ( $\approx 125 \mu\text{m}$ ) nego tehnički čisti aluminij ( $\approx 82 \mu\text{m}$ ). Ovo je također posljedica različite mikrostrukture i svojstava.
- Veličina trošene površine uzoraka ima utjecaj na intenzitet trošenja i ne smije se zanemariti pri iskazivanju rezultata.

## LITERATURA

- [1] Ivušić, V.: Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 1998.
- [2] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrosenjeIPodmazivanje.pdf>.
- [3] G. Heffer, „Trošenje triboloških prevlaka pri gibanju u masi slobodnih čestica“, Disertacija, FSB, Zagreb, 2002.
- [4] Grilec, Krešimir; Ivušić, Vinko; Tribologija, autorizirana predavanja; Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 2011.
- [5] K.-H. Zum Gahr, „Microstructure and Wear of Materials“, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York 1987.
- [6] F. Cajner, B. Matijević, K. Grilec, S. Jakovljević: Predavanja i vježbe iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [7] J.J. Coronado: „Effect of Abrasive Size on Wear“, Research Group of Fatigue and Surfaces, Mechanical Engineering School, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- [8] G. K. Nathan and W. J. D. Jones: „The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions“, Wear, 9 (1966) 300 – 309.
- [9] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma2024t4>
- [10] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indolf: „Svojstva i primjena materijala“, FSB, Zagreb, 2002.
- [11] ASM Handbook Volume 09 – Metallography And Microstructures, 2004.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**